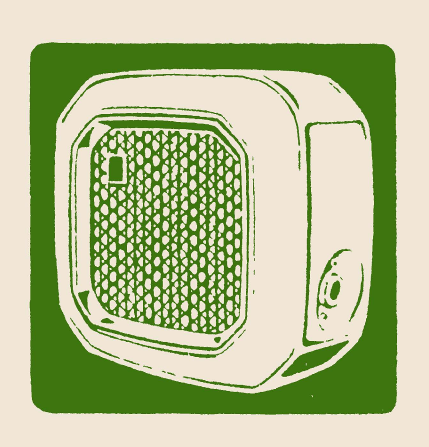


М. С. ЖУК

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЬ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ДАННЫЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

Тип динамика	Мощность, *вт*	Звуковая катушка			Катушка подмагничивания			№ примечания
		Сопротивление, *ом*	Число витков	Диаметр провода, *мм*	Сопротивление, *ом*	Число витков	Диаметр провода, *мм*	
ДШ	1,5	10	134	0,18	10 000	47 000	0,12	
ДД-3 (нов.)	3	3	53	0,2	750	10 000	0,24	
ДД-6	6	4,1	59	0,2	750	10 000	0,24	
ДАГ-1	0,25	2	49	0,2	С постоянным магнитом			
ВЭФПЕР-1	0,25	2,1	50	0,2	То же			
0,35 ГД („Малютка“)	0,35	4,3	53	0,12	„ „			
1ГДМ-1,5 („Рекорд“; „Рекорд-47“)	1,5	3,25	60	0,16	„ „			
1ГД1 (АРЗ-49, „Москвич-В“)	1	2,8	62	0,18	„ „			
2ГДП-3 („Восток-47“, „Урал-47“)	3	3	65	0,2	1 200	14 400	0,2	
2ГДМ-3 („Родина“, „Родина-47“ „Москвич“, „Урал-49“)	3	3,8	66	0,18	С постоянным магнитом			
3-ГД-3 („Восток-49“, „Родина-47“ —последний выпуск, радиола „Урал-49“)	3	3,4	62	0,18	То же			
Завода Ленкинап: 4-А-10	6	11,5	158	0,16	5 400	31 000	0,14	1
Завода Ленкинап: 4-А-15	6	11,5	158	0,16	44	3 000	0,49	1
Завода Ленкинап: 4-А-16	6	11,5	158	0,16	400	8 500	0,27	1
Завода Ленкинап: 4-А-18-А	6	11,5	158	0,16	С постоянным магнитом			1
Завода Ленкинап: 1-А-10	10	11,5	65	0,14	20,2	2 380	0,8	

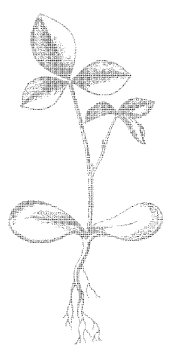
Примечание. 1. Звуковая катушка намотана в четыре слоя.

МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА
ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 65

М. С. ЖУК

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЬ







ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1950 ЛЕНИНГРАД

В брошюре описываются устройство и принцип работы электродинамического громкоговорителя.

В ней говорится о путях, которыми достигается высококачественное звучание от радиоустановки.

Кроме того, брошюра содержит ряд практических советов по ремонту электродинамических громкоговорителей.

СОДЕРЖАНИЕ

Редактор *Р. Д. Мельниковская* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

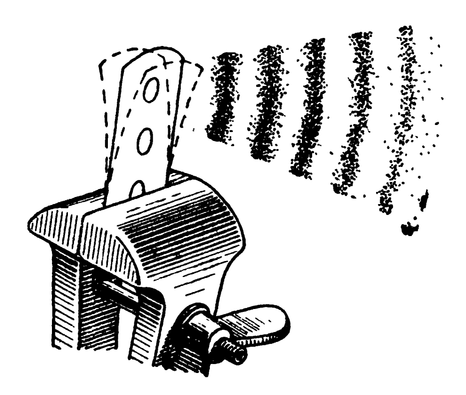
Сдано в набор 4/V 1950 г. Подписано к печати 13/VII 1950 г.
Бумага 82×108 1/32 — 5/8 бум. л. — 2,05 п. л. 2,5 уч.-изд. л.
Т-05903 Тираж 25 000 Заказ 145

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

Назначением любого громкоговорителя, в том числе и электродинамического, является воспроизведение самых различных вещательных программ. Это может быть речь диктора, игра большого симфонического оркестра, трансляция спектакля из театра, трансляция со стадиона и т. д. Любая из этих программ состоит из большого количества отдельных звуков. Поэтому для того, чтобы понять, как работает динамический громкоговоритель и как оценивается качество его работы, надо прежде всего выяснить, что такое звук.

ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Представим себе тонкую металлическую пластинку, например, лезвие безопасной бритвы, зажатую с одной стороны в тиски (фиг. 1). Если несколько отвести свободный конец пластинки от среднего положения, а затем отпустить его, то пластинка совершит ряд хорошо заметных колебаний. Одновременно будет слышен постепенно затихающий звук. Колебания пластинки происходят так же, как и колебания маятника стенных часов. В левом крайнем положении пластинка на мгновение останавливается, а затем начинает двигаться вправо. Скорость движения увеличивается до тех пор, пока пластинка не дойдет до среднего положения. Затем движение замедляется и в крайнем правом положении пластинка опять на мгновение останавливается. В сле-



Фиг. 1. Колеблющаяся пластинка.

дующее мгновение пластинка начинает двигаться в обратном направлении и опять скорость ее движения будет возрастать до тех пор, пока пластинка не окажется в среднем положении. Далее движение опять замедляется, и когда пластинка окажется в первоначальном (крайнем левом) положении, ее скорость опять будет равна нулю, т. е. здесь пластинка на мгновение остановится.

Рассмотренное колебательное движение пластинки характеризуется двумя основными показателями — числом колебаний, которое пластинка совершает за 1 сек., и амплитудой этих колебаний, т. е. расстоянием от любого крайнего положения пластинки до ее среднего положения.

Число колебаний в 1 сек. называют частотой колебаний.

Во время колебаний пластинка то сжимает ближайший к ней слой воздуха, то — когда она идет в обратную сторону — образует разреженный слой. Эти чередующиеся разрежения и сжатия распространяются в окружающем воздухе во все стороны подобно тому, как распространяются на воде круги от брошенного камня.

Распространяющиеся в воздухе разрежения и сжатия мы воспринимаем как некоторый звук. Следовательно, звук — это колебательное движение частиц воздуха. Это движение распространяется в воздухе со скоростью 330 *м/сек*, образуя так называемые звуковые волны.

Как же колеблется частичка воздуха в звуковой волне? Для того чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим колебания слоя воздуха, непосредственно прилегающего к пластинке. Для простоты рассуждений предположим, что пластинка бесконечно велика (т. е. размеры ее очень велики по сравнению с теми расстояниями, на которых мы рассматриваем звуковую волну) и все ее точки совершают одинаковые колебания. Тогда все частички первого слоя воздуха, лежащего перед пластинкой, будут находиться в одинаковых условиях, и создаваемое звуковое поле будет однородным на любом расстоянии от источника звука.

Итак, мы отвели пластинку назад и отпустили ее. Пластинка начнет двигаться со все возрастающей скоростью и через некоторое время достигнет своего начального положения. Затем пластинка отклонится в противоположную сторону почти на такое же расстояние.

В начале движения скорость пластинки, а также частиц первого тонкого слоя воздуха перед пластинкой равна нулю. Давление, испытываемое этим слоем, равно атмосферному,

так называемому статическому давлению. Затем по мере движения пластинки прилегающий к ней слой воздуха сжимается и давление в этом слое воздуха увеличивается. Это избыточное давление, возникающее при звуковых колебаниях, называется звуковым давлением. Оно достигает максимума в момент, когда пластинка проходит среднее положение; в этот момент сжатие слоя воздуха наибольшее.

Когда пластинка начинает двигаться в обратном направлении, давление в слое уменьшается и становится меньше статического. В слое образуется разрежение по сравнению с нормальной плотностью, избыточное звуковое давление станет отрицательным.

Избыточное давление, возникшее во время сжатия первого прилегающего к пластинке слоя, вызовет движение частиц воздуха в следующем слое, прилегающем к первому. Частицы эти будут двигаться также в направлении от пластинки, что вызовет сжатие и повышение давления в следующем слое. Наоборот, когда в первом слое возникнет разрежение, то частицы следующего, прилегающего к нему слоя начнут двигаться по направлению к первому слою, и во втором слое постепенно образуется разрежение. Таким образом, сжатие и разрежение, создаваемые пластинкой в прилегающем слое воздуха, постепенно передаются от слоя к слою.

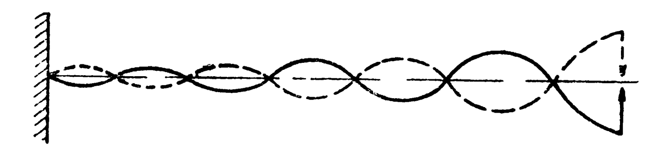
Движение частиц любого слоя воздуха, параллельного рассмотренному, будет совершенно аналогично движению частиц первого слоя, отличаясь от него только моментом начала колебаний.

Мы рассмотрели самую простую, так называемую плоскую звуковую волну. Но и в сложных звуковых волнах в отдалении от источника звука картина колебаний отдельных частиц воздуха будет примерно такая же, как и в плоской волне.

Таким образом, в звуковой волне каждая частица воздуха совершает колебательное движение относительно положения равновесия, причем направление этих колебаний совпадает с направлением движения волны. Поэтому звуковые волны называют продольными в отличие от поперечных волн, в которых направление колебания отдельных частиц среды перпендикулярно к направлению движения волны. Примером поперечных волн могут служить упоминавшиеся уже волны на поверхности воды.

Простейшие поперечные волны легко получить на достаточно длинной горизонтальной веревке, если колебать один из ее концов (фиг. 2).

Звук так же, как и колебание пластинки, характеризуется двумя величинами — частотой и амплитудой звукового давления. Величина амплитуды звукового давления определяет силу звука. Чем больше эта амплитуда, тем громче звук. Звуковое давление (подразумевается его амплитуда) измеряется в специальных акустических единицах — барах.



Фиг. 2. Поперечные волны.

1 бар — это давление, создаваемое силой в 1 *дину*, равномерно распределенное на площади 1 $см^2$. Бар равен примерно одной миллионной доле нормального атмосферного давления. Человеческое ухо способно воспринимать как звуковое ощущение давления величиной от десяти тысячных бара до сотен бар. Давление большей величины воспринимается уже как болевое ощущение.

Частота колебаний частиц воздуха определяет высоту звука. Если частота мала, то звук низкий, густой; если частота большая, то звук высокий, тонкий. Человек слышит звук не всегда. Если, например, взять длинную чертежную линейку, зажать ее одним концом в тиски и заставить колебаться так же, как колебалась в предыдущем случае металлическая пластинка, то линейка будет колебаться сравнительно медленно и звука мы не услышим. Оказывается, что человек слышит звук только в том случае, если частота колебаний частиц воздуха лежит в пределах примерно от 16 до 20 000 *гц* (1 герц равен 1 колебанию в секунду). Если частота колебаний меньше 16 *гц*, как в приведенном примере с длинной линейкой, то мы звука не услышим. Такие колебания (и волны) называются инфразвуковыми. При частоте выше 20 000 *гц* волны называются ультразвуковыми.

В любом громкоговорителе имеется колеблющаяся поверхность, которая и образует в воздухе звуковые волны. Говорят, что громкоговоритель излучает звук.

УСТРОЙСТВО ДИНАМИКА

Громкоговоритель получает от приемника или трансляционной сети электрическую энергию; за счет этой энергии и происходит излучение звука.

Таким образом, всякий громкоговоритель осуществляет преобразование электрической энергии токов звуковой частоты в механические колебания той или иной поверхности, излучающей далее звуковые волны. Известно несколько физических явлений, при помощи которых можно провести такое преобразование.

В зависимости от того, на каком явлении основано электромеханическое преобразование, различают типы громкоговорителей. В настоящее время встречаются три основных типа громкоговорителей — электромагнитные, пьезоэлектрические и электродинамические. Из них только электродинамические громкоговорители обеспечивают достаточно хорошее качество воспроизведения вещательных передач. Кроме того, их конструкция проста и надежна. Поэтому электродинамические громкоговорители получили сейчас наибольшее распространение.

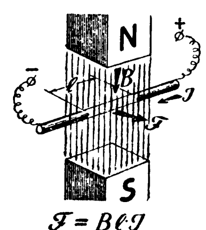
Все громкоговорители, в том числе и электродинамические, по способу излучения звука разделяются на две группы — громкоговорители диффузорные, излучающие звук непосредственно в окружающее пространство, и громкоговорители рупорные, излучающие звук через рупор.

Радиолюбителям в огромном большинстве случаев приходится иметь дело с диффузорными громкоговорителями. Поэтому мы ограничимся описанием работы диффузорных электродинамических громкоговорителей, причем для краткости будем называть их в дальнейшем просто динамиками.

Работа динамика основана на взаимодействии электрического тока с магнитным полем. Если поместить проводник, по которому протекает ток, в магнитное поле так, как это показано на фиг. 3, то на провод будет действовать определенная сила. Ее величина F пропорциональна силе тока I, магнитной индукции B и длине l проводника, находящегося в поле.

Кроме того, эта сила имеет вполне определенное направление, зависящее от направления тока и направления магнитных силовых линий (фиг. 3). Если направление тока изменится на обратное, то и сила будет действовать в противоположную сторону.

Таким образом, если по проводу, помещенному в постоянное магнитное поле, протекает переменный ток звуковой частоты, то сила, действующая на провод, повторит все изменения величины и направления этого тока.



Фиг. 3 Проводник с током в магнитном поле.

В динамиках провод, помещаемый в магнитное поле, конструктивно выполняется большей частью в виде двухслойной катушки. Ее называют обычно звуковой катушкой. Катушка помещается в кольцевом зазоре, в котором с помощью магнитной системы создается радиальное магнитное поле.

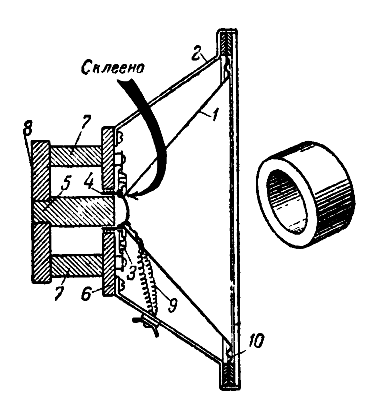
Устройство динамика с постоянным магнитом показано в разрезе на фиг. 4. Здесь магнитное поле в зазоре создается сильным кольцевым магнитом 7, который показан отдельно на том же рисунке справа. Магнит делается обычно из специального алюминиево-никелевого сплава «альни». Магнитное поле замыкается по заднему фланцу *8*, керну *5* и переднему фланцу *6*. Все эти детали сделаны из мягкой стали. Между керном и передним фланцем оставлен кольцеобразный зазор.

Звуковая катушка *4* склеивается с вершиной бумажного конуса-диффузора *1*, который широкой частью укреплен в держателе. Однако, благодаря податливости гофрированной части *10* диффузора такое крепление недостаточно для того, чтобы звуковая катушка помещалась точно в середине магнитного зазора и не задевала за его стенки во время работы динамика. Поэтому, кроме диффузора, к катушке присоединяется так называемая центрирующая шайба *3*, служащая для точной установки катушки в зазоре. Она изготовляется обычно из тонкого прессшпана или текстолита. В динамике, изображенном на фиг. 4, центрирующая шайба изготовлена из того же материала, что и диффузор — из бумажной массы и пропитана затем специальным лаком. Подвижная система такого динамика, состоящая из звуковой катушки, центрирующей шайбы и диффузора, показана в собранном виде на фиг. 5.

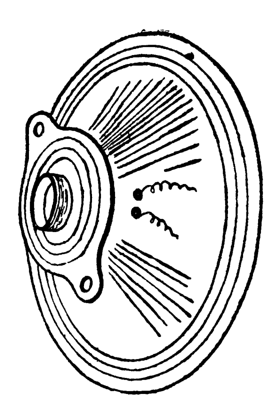
Во время работы динамика по его звуковой катушке протекает ток низкой частоты. При этом величина и направление действующей на катушку силы изменяются по тому же закону, что величина и направление тока в катушке. Под действием этой силы подвижная система динамика совер-

шает колебания, повторяющие с некоторым приближением все изменения действующей силы, а следовательно, и тока низкой частоты в катушке.

Подробно о том, как колеблется подвижная система динамика под действием электродинамической силы, мы



Фиг. 4. Разрез динамика с постоянным магнитом.


Фиг. 5. Подвижная система динамика.

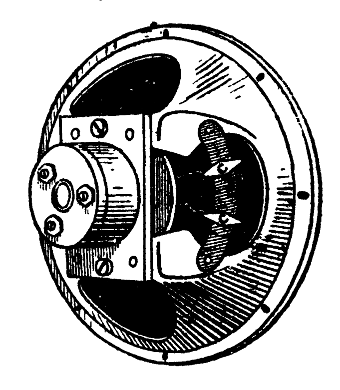
расскажем несколько ниже, в главе «Колебания подвижной системы динамика».

Существуют две системы динамиков — с постоянным магнитом и с подмагничиванием. У динамика с постоянным магнитом поле в зазоре создается с помощью сильного постоянного магнита, сделанного из специального сплава. Общий вид системы с кольцевым магнитом показан на фиг. 6, а ее разрез — на фиг. 4.

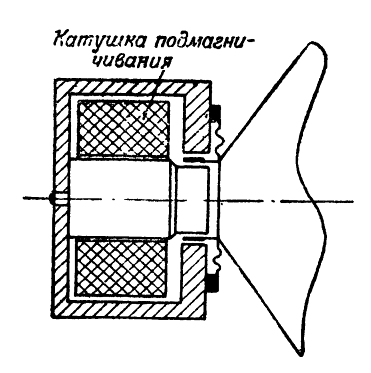
У динамиков с подмагничиванием магнитное поле в зазоре создается с помощью электромагнита. Его обмотка, имеющая большое количество витков (катушка подмагничивания), помещается на центральном стержне магнитной системы. На месте постоянного магнита в этом случае устанавливается скоба из той же мягкой стали, из которой сделаны и остальные части магнитной системы. По катушке подмагничивания пропускается постоянный ток, создающий сильное магнитное поле. Подмагничивание динамика требует дополнительного расхода энергии. Разрез динамика с подмагничиванием показан на фиг. 7.

В приемных схемах катушка подмагничивания динамика используется обычно в качестве дросселя фильтра выпрямителя, от которого питается приемник. При этом сопротивление катушки подмагничивания постоянному току не должно превышать 800—1 000 *ом.*

За счет пульсаций выпрямленного тока, протекающего по катушке подмагничивания, будет изменяться и величина



Фиг. 6. Общий вид динамика с постоянным магнитом.



Фиг. 7. Разрез динамика с подмагничиванием.

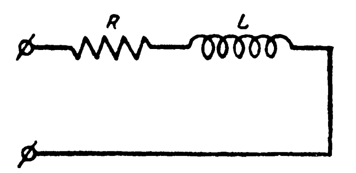
магнитной индукции в рабочем зазоре. В динамике неизбежно появится фон переменного тока, иногда довольно значительный. Для его устранения применяют метод компенсации, заключающийся в следующем. На катушку подмагничивания сверху наматывают несколько витков провода диаметром 0,6 — 0,8 *мм.* Концы этой дополнительной обмотки, называемой компенсационной, включают во вторичную цепь выходного трансформатора последовательно со звуковой катушкой динамика. При таком включении пульсации выпрямленного тока попадают через компенсационную обмотку в звуковую катушку. Таким образом, на подвижную систему одновременно будут действовать две силы с частотой пульсаций выпрямленного тока: одна за счет изменения величины магнитной индукции B в зазоре и другая за счет подачи напряжения из компенсационной обмотки. В зависимости от включения концов компенсационной обмотки эти силы могут действовать как в одном направлении, так и навстречу друг другу. В первом случае фон усиливается, во втором ослабляется.

Практически компенсация производится так. Сначала наматывают на катушку подмагничивания 10—12 витков и включают их последовательно со звуковой катушкой. Предварительно пробуют менять местами концы этой обмотки, чтобы выяснить то положение их, при котором фон в динамике уменьшается. Далее увеличивают число витков компенсационной обмотки до тех пор, пока фон почти не исчезнет. Подбор числа витков компенсационной обмотки надо производить, включив все лампы приемника, т. е. приведя его в рабочее состояние. В качестве примера укажем, что в распространенном до войны динамике ДП-37, стоявшем в приемниках 6Н-1 и 9Н-4, антифонная катушка имела 27 витков провода диаметром 1,2 *мм*.

ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДИНАМИКА

Звуковая катушка динамика в действующей установке подсоединяется к выходу усилителя низкой частоты, т. е. она является его электрической нагрузкой. Поэтому для того, чтобы разобраться в вопросах качества работы динамика, надо выяснить, как изменяется в зависимости от частоты сопротивление звуковой катушки динамика.

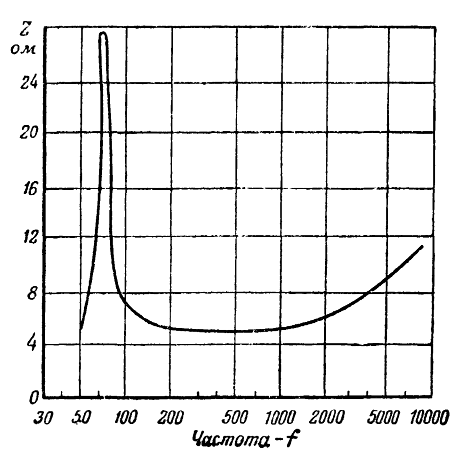
На первый взгляд этот вопрос излишен — звуковая катушка обладает небольшими индуктивностью и активным сопротивлением; ее эквивалентную схему можно представить в виде некоторой индуктивности, включенной последовательно с активным сопротивлением (фиг. 8). Полное сопротивление такой цепи, как известно, растет примерно прямо пропорционально частоте. Однако, эти рассуждения верны только в том случае, если катушка неподвижна, т. е. если она искусственно заторможена. Тогда ее индуктивное сопротивление ($2\pi fL$) вызывается наличием противоэлектродвижущей силы самоиндукции. Эта сила тем больше, чем быстрее изменяется величина тока в катушке, т. е. чем выше его частота.



Фиг. 8 Эквивалентная схема заторможенной звуковой катушки.

В реальных же условиях звуковая катушка благодаря взаимодействию протекающего по ней тока с магнитным полем совершает колебания в рабочем зазоре. При этом, кроме противоэлектродвижущей силы самоиндукции, в ка-

тушке возникает еще и другая противоэлектродвижущая сила, вызываемая тем, что при движении в зазоре катушка пересекает магнитные силовые линии. Эта вторая э. д. с. прямо пропорциональна скорости движения катушки, а следовательно, и амплитуде ее колебаний. Как мы увидим ниже, амплитуда колебаний подвижной системы динамика, а следовательно, и звуковой катушки, имеет наибольшую величину на частоте своего механического резонанса. Резонанс подвижной системы динамиков лежит в области низких частот порядка 80—150 *гц*. Поэтому на этих частотах полное сопротивление звуковой катушки резко возрастает и превышает величину своего активного сопротивления в 8—10 раз.



Фиг. 9. Кривая зависимости полного сопротивления динамика от частоты.

Зависимость полного сопротивления динамика ДД-3 от частоты имеет характерный вид резонансной кривой (фиг. 9). Резонансный пик лежит на частоте 70 *гц*. На более высоких частотах величина сопротивления уменьшается и на частоте порядка 400 *гц* становится равной величине активного сопротивления звуковой катушки. Это явление объясняется тем, что на частотах выше резонансной противоэлектродвижущая сила, вызванная движением катушки, направлена навстречу противоэлектродвижущей силе самоиндукции. На какой-то средней частоте, в рассматриваемом случае на частоте 400 *гц*, эти две э. д. с. взаимно уничтожаются, и полное сопротивление звуковой катушки становится равным активному сопротивлению. Поэтому в паспорте динамиков всегда приводят только величину активного сопротивления звуковой катушки и с нею же оперируют во всех расчетах, хотя, на первый взгляд, это противоречит элементарным законам электротехники.

На высших частотах полное сопротивление катушки несколько возрастает за счет возрастания противоэлектро-

движущей силы самоиндукции. Таким образом, мы видим, что эквивалентная схема динамика значительно сложнее, чем схема, показанная на фиг. 8.

У большинства радиовещательных динамиков малой и средней мощности активное сопротивление звуковой катушки равно 2—3 *ом*, а у динамиков мощностью 6—10 *вт*, предназначаемых для радио и киноустановок, 10—12 *ом*.

ЧТО ВОСПРОИЗВОДИТ ДИНАМИК

Мы выяснили, что каждый простой музыкальный звук прежде всего характеризуется своей частотой. Поэтому для получения естественности звучания надо, чтобы громкоговоритель одинаково хорошо воспроизводил слышимые частоты, т. е. частоты от 16 до 20 000 *гц*. Осуществить это с помощью одного громкоговорителя на современной ступени развития техники невозможно, а в радиовещании в большинстве случаев и не нужно. Дело в том, что токи звуковой частоты проходят через все звенья радиовещательного тракта, конечным звеном которого является громкоговоритель. Обычный радиовещательный тракт не обеспечивает равномерного пропускания всей полосы звуковых частот. Поэтому приходится мириться с воспроизведением более узкой полосы; при этом в какой-то степени теряется естественность звучания передачи.

Трудно назвать определенные границы полосы частот, равномерное воспроизведение которой обеспечивало бы хорошее звучание передач. Наименьшую полосу частот пропускает обычный городской телефон — примерно от 250 до 2 500 *гц*. Речь при этом вполне разборчива, но окраска голоса заметно изменяется. Известно, что при первом разговоре по телефону даже голос хорошо знакомого человека трудно узнать. Надо поговорить с ним несколько раз, т. е. заново привыкнуть к его «телефонному» голосу.

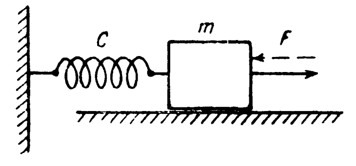
Первоклассные современные звуковоспроизводящие установки достаточно равномерно пропускают полосу от 30—50 до 10 000 *гц*. Если при этом отсутствуют и другие искажения, вносимые обычно аппаратурой, то передача весьма близка к натуральному звучанию того же источника звука.

Хорошие вещательные приемники воспроизводят полосу частот примерно от 80—100 до 5 000—6 000 *гц*. Полоса, пропускаемая аппаратурой радиовещательного узла, еще уже. Таким образом, хороший громкоговоритель, предназна-

ченный для установки в приемнике, должен пропускать с допустимой неравномерностью полосу частот от 80—100 до 6 000 *гц*.

КОЛЕБАНИЯ ПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЫ ДИНАМИКА

Посмотрим, как же зависит воспроизведение громкоговорителем звука от частоты. Мы видели, что сила, действующая на подвижную систему динамика, прямо пропорциональна току в звуковой катушке. Последний же зависит от величины полного сопротивления катушки. С некоторым приближением можно считать, что за исключением области механического резонанса, лежащей обычно ниже 100 *гц* (т. е. уже вне полосы воспроизведения), сопротивление звуковой катушки почти не меняется с изменением частоты и равно ее активному сопротивлению (фиг. 9). Таким образом, в воспроизводимой полосе частот величина тока в катушке, а следовательно, и сила, действующая на подвижную систему динамика, почти не зависят от частоты. Интенсивность же излучения звука диффузором зависит от скорости его движения. Следовательно, надо выяснить, как же колеблется диффузор динамика или, что то же самое, его подвижная система под действием этой силы. Для этого рассмотрим поведение простейшей механической колебательной системы, состоящей из груза *m*, прикрепленного к неподвижной опоре с помощью пружины *C* (фиг. 10), под действием переменной силы *F*.



Фиг. 10. Простейшая механическая колебательная система.

Такая система совершенно аналогична рассмотренной выше пластинке, закрепленной одним концом в тисках. Если отвести грузик от положения равновесия, например влево, и отпустить его, то он тоже совершит ряд затухающих колебаний вокруг положения равновесия. Частота, с которой грузик будет колебаться, называется частотой собственных колебаний. Ее величина зависит от массы грузика и упругости пружины.

Если на грузик будет действовать такая же переменная сила, как и на звуковую катушку динамика при протекании по ней переменного тока какой-нибудь звуковой частоты, то грузик будет колебаться с частотой действующей силы. Амплитуда колебаний грузика, а следовательно, и его ско-

рость при прохождении среднего положения будут зависеть не только от наибольшего значения (амплитуды) действующей силы, но и от ее частоты.

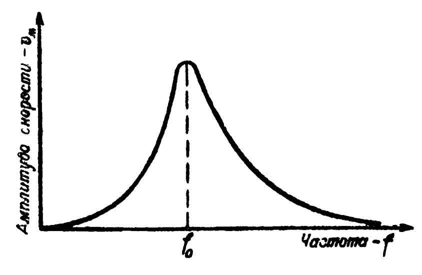
Для наших рассуждений важна именно наибольшая скорость грузика — та скорость, которую он имеет при прохождении положения равновесия. Эта скорость прямо пропорциональна величине действующей силы и обратно пропорциональна так называемому полному механическому сопротивлению рассматриваемой системы. Последнее складывается (геометрически) из трех частей: 1) инерциального сопротивления колеблющейся массы, вызываемого тем, что по закону инерции каждая масса стремится сохранить состояние покоя или прямолинейного равномерного движения; 2) упругого сопротивления пружины, вызываемого той возвратной силой, которую развивает пружина при смещении груза из положения равновесия; 3) активного сопротивления, вызываемого невозвратимыми потерями энергии (на трение и на излучение звука).

Инерциальное сопротивление массы и упругое сопротивление пружины по своему характеру противоположны. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим какой-либо момент движения грузика. Пусть, например, грузик, двигаясь направо, находится на половине пути между положением равновесия и крайней правой точкой движения. В этот момент пружина тормозит движение грузика, а инерция массы, наоборот, поддерживает это движение — грузик стремится продолжать движение с имеющейся у него большой скоростью. Через некоторое время, когда грузик пройдет крайнее правое положение и придет опять в эту же точку, наоборот, пружина будет подгонять грузик, а инерция массы — тормозить его движение.

Инерциальное сопротивление массы прямо пропорционально частоте приложенной силы; упругое сопротивление, наоборот, обратно пропорционально частоте; активное же сопротивление от частоты не зависит.

Таким образом, на низших частотах главную роль играет упругое сопротивление пружины. На этих частотах инерциальное сопротивление массы невелико и поэтому оно почти не сказывается. С увеличением частоты упругое сопротивление пружины уменьшается, а кроме того, все большая и большая его часть будет уравновешиваться инерциальным сопротивлением массы. На частоте собственных колебаний системы, т. е. на частоте, с которой колеблется грузик, если

его отвести от положения равновесия и отпустить, упругое сопротивление пружины целиком уравновешивается инерциальным сопротивлением массы. На этой частоте, называемой частотой резонанса, действующая сила будет встречать только активное сопротивление. Активное сопротивление в колебательных системах невелико и на частотах, далеких от резонансной, на поведении системы не сказывается.



Фиг. 11. Кривая зависимости изменения скорости грузика от частоты. Величина действующей силы постоянна.

При дальнейшем увеличении частоты главную роль будет играть уже инерциальное сопротивление массы — общее сопротивление в области, далекой от резонанса, будет расти примерно пропорционально частоте.

Вернемся теперь к действию силы на рассматриваемую колебательную систему. Как же будет меняться максимальное значение скорости движения массы в рассматриваемой системе в зависимости от частоты? Так как величина действующей силы не зависит от частоты, то скорость будет изменяться обратно пропорционально изменению полного сопротивления системы. Таким образом, максимальное значение скорости (скорость, которую имеет грузик при прохождении им положения равновесия) на низких частотах будет мало́. С увеличением частоты скорость будет расти и достигнет наибольшего значения на частоте резонанса (фиг. 11). На частотах выше резонансной скорость движения грузика уменьшается, причем это уменьшение обратно пропорционально частоте.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Мы выяснили, что колеблющаяся поверхность создает в окружающей среде — воздухе — разрежения и сжатия, распространяющиеся в виде звуковой волны. Для создания этих волн колеблющаяся поверхность совершает некоторую работу. Эта работа определяет ту полезную звуковую или, как чаще говорят, акустическую мощность, которую излучающая звук поверхность отдает в окружающую среду (мощность — это среднее значение работы за 1 сек.).

Если бы поверхность совершала не колебательное, а поступательное движение, то мощность, поглощаемая средой, была бы равна силе, действующей на поверхность, умноженной на скорость ее движения:

$$P = Q \cdot v\,.$$

Сила, с которой среда действует на поверхность, при обычных скоростях прямо пропорциональна скорости (механический закон Ома)

$$Q = r \cdot v\,.$$

Коэффициент пропорциональности r называется сопротивлением среды. Этот коэффициент численно равен силе, с которой среда действует на поверхность при скорости, равной 1 *см/сек.*

Подставив значение силы $Q = r \cdot v$ в формулу мощности, получим:

$$P = r \cdot v^2\,.$$

В случае колебательного движения поверхности скорость этого движения, как мы видели, все время меняется. Поэтому в формулу надо подставить среднее значение скорости, определяемое выражением $v_{ср} = \frac{v_{макс}}{\sqrt{2}}$, где $v_{макс}$ — максимальное значение скорости. Тогда отдаваемая громкоговорителем акустическая мощность будет равна

$$P = \frac{1}{2} \cdot r \cdot v^2_{макс}\,.$$

Сопротивление среды r при колебательном движении называется сопротивлением излучения.

Полученная формула позволяет выяснить зависимость излучаемой динамиком акустической мощности от частоты излучаемого звука.

Для того чтобы понять, как протекает процесс излучения звука в реальных условиях, посмотрим, как изменяются с частотой сопротивление излучения r и максимальное значение колебательной скорости v.

Сопротивление излучения зависит от многих факторов, но для случая работы динамика в щите достаточно больших размеров (о том, для чего нужен щит, мы расскажем ниже)

на низших частотах (примерно до 500 *гц*) сопротивление излучения растет примерно пропорционально квадрату частоты. Если бы диффузор динамика колебался на всех частотах с одной и той же наибольшей скоростью $v_{макс}$, то излучаемая им акустическая мощность росла бы пропорционально квадрату частоты, что нежелательно. Для получения постоянства излучаемой динамиком акустической мощности необходимо, чтобы наибольшее значение скорости колебания диффузора (а, следовательно, и всей подвижной системы динамика) убывало обратно пропорционально частоте. Тогда второй множитель формулы акустической мощности $v^2{}_{макс}$ будет убывать обратно пропорционально квадрату частоты и тем самым будет компенсировать возрастание сопротивления излучения.

Максимальное значение скорости подвижной системы в области, лежащей выше частоты механического резонанса подвижной системы динамика, как уже указывалось, убывает обратно пропорционально частоте.

Таким образом, для равномерного воспроизведения необходимо, чтобы резонансная частота подвижной системы динамика лежала ниже рабочей области частот. При этом в рабочей области инерциальное сопротивление массы системы будет значительно преобладать над упругим сопротивлением подвеса (центрирующей шайбы и внешнего гофра диффузора), и большая часть действующей силы будет расходоваться на преодоление этого сопротивления. Поэтому коэффициент полезного действия (к. п. д.) динамиков очень невелик — в акустическую мощность преобразуется всего 1—2% электрической мощности, подводимой к звуковой катушке. Остальная мощность уходит на бесполезный нагрев провода звуковой катушки.

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИНАМИКА

Измерение излучаемой динамиком акустической мощности, а также подводимой к нему электрической мощности очень сложно и требует специальной измерительной аппаратуры. Поэтому об эффективности громкоговорителей судят не по к. п. д., а по другим показателям, наиболее употребительным из которых является так называемая чувствительность.

Чувствительностью называют то звуковое давление, которое развивает громкоговоритель в точке, находящейся на

расстоянии 1 *м* по оси при подведении к его клеммам напряжения, равного 1 *в*.

Если при измерениях к громкоговорителю подводится напряжение, равное нескольким вольтам, то чувствительность можно подсчитать, разделив создаваемое им звуковое давление (в барах) на число вольт. Таким образом, чувствительность измеряется в барах на вольт.

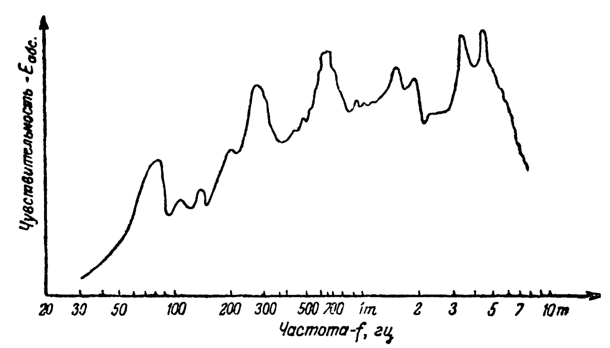
Из электротехники известно, что мощность данной установки определяется не только величиной напряжения, но и входным сопротивлением устройства. Так как громкоговорители могут иметь совершенно различные величины сопротивления, то чувствительность полностью не определяет эффективность их работы.

Эффективность преобразования можно оценить более полно, если измерить звуковое давление, даваемое громкоговорителем в той же точке на расстоянии 1 *м* по его оси при подведении к нему мощности 1 *вт*. Эта величина называется абсолютной чувствительностью и измеряется в барах на квадратный корень из *вт*. Эти две величины связаны между собой соотношением $E_{абс} = E \cdot \sqrt{z}$, где $E_{абс}$ — абсолютная чувствительность, E — чувствительность, z — полное сопротивление громкоговорителя.

Наглядное представление о зависимости абсолютной чувствительности громкоговорителя от частоты дает частотная характеристика громкоговорителя (фиг. 12). Проследим ход этой характеристики, начиная с самых низких частот. Резонансная частота подвижной системы в большинстве случаев лежит на частотах 80—100 *гц*. В области резонанса полное сопротивление звуковой катушки и отдача (к. п. д.) динамика резко возрастают. Казалось бы, что в этой области абсолютная чувствительность динамика тоже должна резко увеличиться. Но здесь примешивается другое обстоятельство — уменьшение излучения на этих частотах за счет явления, называемого «акустическим коротким замыканием». Дело в том, что при колебании диффузора динамика звуковые волны возбуждаются обеими его сторонами. При этом, когда по одну сторону диффузора возникает сжатие, то по другую возникает разрежение. На низких частотах колебания воздуха с одной стороны успевают обогнуть диффузор и перейти на другую его сторону. Это явление имеет место только в области низких частот, так как огиба-

ние диффузора излучаемой им же звуковой волной возможно только, если длина волны много больше его размеров.

Для уменьшения вредного влияния «акустического короткого замыкания» динамик монтируют в щите достаточно больших размеров. В этом случае передняя и задняя стороны диффузора разделены щитом, и «короткое замыкание» возможно лишь на самых низких частотах, лежащих уже вне воспроизводимого диапазона.

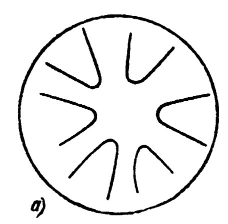


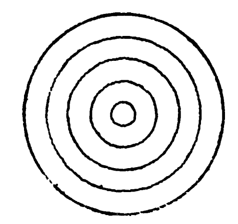
Фиг. 12. Кривая зависимости изменения абсолютной чувствительности динамика от частоты.

Но и при монтаже динамика в щите или в ящике приемника на низких частотах излучение оборотной стороны диффузора все же сказывается. Кроме того, теория показывает, что эффективное излучение звука происходит только в том случае, когда размеры излучателя больше длины излучаемой звуковой волны. На низких же частотах, наоборот, длина волны становится больше излучающей части динамика. В результате интенсивность излучения на низких частотах сравнительно мала и чувствительность в сторону низких частот в общем падает (фиг. 12). На частотах выше резонансной сопротивление звуковой катушки и отдача динамика почти не зависят от частоты. Можно было бы ожидать, что чувствительность на этих частотах тоже будет постоянна. Но из частотной характеристики динамика видно, что на самом деле этого не происходит. Посмотрим, в чем же здесь дело.

Приведенные ранее рассуждения основывались на предположении, что диффузор колеблется как единое целое, как жесткий поршень. Оказывается, что это предположение верно только на низких частотах, т. е. только при достаточно

медленных колебаниях. Уже на частотах порядка 300—400 *гц* диффузор перестает колебаться как единое целое. Различные его области колеблются на этих частотах с различной амплитудой и различной фазой. Например, в момент, когда скорость одной области уже достигла своей наибольшей величины, скорость другой еще продолжает расти, а скорость третьей начала уже уменьшаться. В результате общее излучение уменьшится и будет сильно зависеть от фазы колебания различных областей и от их распределения по всему диффузору. На некоторых частотах имеют место явления резонанса, причем на резонансных частотах излучение будет резко возрастать или падать в зависимости от формы колебания диффузора. На фиг. 13





Фиг. 13. Форма колебаний диффузора на средних и высших частотах.

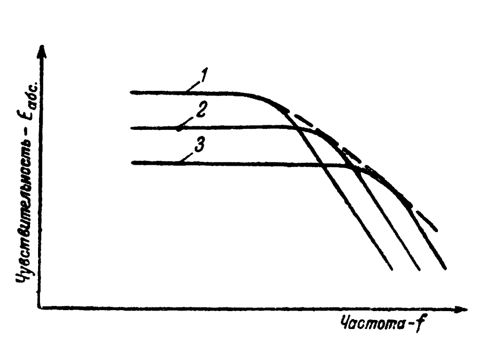
приведены для иллюстрации две наблюдающиеся формы резонансных колебаний диффузора на средних и высоких частотах. Фиг. 13,*а* соответствует средней частоте. Области, расположенные по различным сторонам черных линий, колеблются в противофазе. Эти линии представляют собой фигуры, образованные порошком талька, который посыпается на колеблющийся диффузор. Для того чтобы тальк удерживался на конусе, весь динамик приводится во вращение. Тальк собирается в тех местах диффузора, где амплитуда колебаний равна нулю.

Фиг. 13,*б* соответствует высоким частотам — выше 3 000 *гц*. Исследования формы колебаний диффузора были проведены в Советском Союзе М. С. Анциферовым.

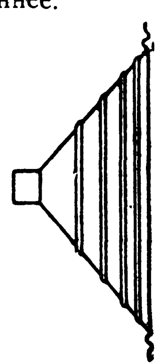
Наличие многочисленных резонансных частот, распределенных по всему диапазону, вызывает большую неравномерность частотной характеристики.

Колебания диффузора на высоких частотах (типа приведенных на фиг. 13,*б*) играют и некоторую положительную роль. Дело в том, что на высоких частотах рост сопротивления излучения жесткого конуса постепенно замедляется,

в то же время наибольшее значение скорости колебаний диффузора продолжает уменьшаться обратно пропорционально частоте. Это вызывает резкое падение интенсивности излучения. Таким образом, жесткий конус не обеспечивает излучения достаточно широкой полосы частот. Предположим, что действующая поверхность конуса с повышением частоты сокращается и одновременно уменьшается масса подвижной системы динамика. Скорость колебания диффузора в этом случае будет убывать с повышением частоты гораздо медленнее, чем в случае жесткого конуса. Поэтому и излучение будет падать несколько медленнее.



Фиг. 14. Характеристики мощности, излучаемой жесткими конусами различных размеров.



Фиг. 15. Устройство гофрированного диффузора.

Это, на первый взгляд парадоксальное, положение иллюстрируется частотными характеристиками мощности, излучаемой тремя жесткими конусами различных размеров (фиг. 14). Первая кривая относится к самому большому конусу. Он излучает наибольшую мощность, но уже при сравнительно невысоких частотах она резко уменьшается. Ход второй кривой показывает, что конус среднего размера, к которому эта кривая относится, излучает меньшую мощность, но падать она начинает на более высоких частотах. Третья кривая показывает, что самый малый конус излучает еще меньшую мощность, но ее падение начинается на еще более высоких частотах. Пунктирная кривая показывает, как будет спадать излучаемая мощность, если действующая поверхность конуса не остается постоянной, а постепенно уменьшается.

Такое полезное уменьшение действующих размеров конуса диффузора можно получить искусственно. Для этого

диффузор делают гофрированным (фиг. 15), причем плоские участки, разделенные кольцевыми гофрами, имеют одинаковую массу.

На низких частотах такой диффузор колеблется как одно целое. На средних и высоких частотах благодаря деформации гофров отдельные кольцевые части диффузора колеблются уже с разными фазами. Кроме того, амплитуда колебаний благодаря потерям в гофрах убывает по мере удаления от центра к краю. Таким образом, на высоких частотах число колец, колеблющихся со значительной амплитудой, все время уменьшается. Происходит автоматическое уменьшение действующей поверхности диффузора. Наличие гофрировки диффузора сказывается благоприятно еще и потому, что гофры препятствуют образованию резонансов типа, показанного на фиг. 13,*а*. Это действие гофров легко представить, если вспомнить, что гофр хорошо деформируется только в одном направлении и не поддается изгибу по осевой линии.

Другой более простой способ достижения эффекта сокращения действующей поверхности диффузора состоит в том, что диффузор делают неоднородным. Средина конуса делается более жесткой и плотной, а дальше, по направлению к краю, жесткость и плотность диффузора уменьшаются. Для этой же цели средняя часть диффузора пропитывается лаком. Именно таким образом изготовляются сейчас диффузоры для динамиков, устанавливаемых в вещательных приемниках.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Мы выяснили, что хороший громкоговоритель должен достаточно равномерно воспроизводить полосу частот примерно от 80—100 до 5 000—7 000 *гц*. Но этого еще недостаточно. Громкоговоритель должен достаточно чисто воспроизводить всю передаваемую программу. Это значит, что излучаемые им звуковые колебания должны в точности совпадать с теми электрическими колебаниями, которые подводятся к его звуковой катушке. Но практически на сильных звуках динамик всегда вносит некоторые искажения в передачу, особенно на низших частотах. Эти искажения вызываются рядом причин; рассмотрим основные из них.

В области низких частот, в особенности вблизи резонанса, амплитуда колебаний подвижной системы динамика достигает значительных величин — до нескольких миллимет-

ров. При таких отклонениях от среднего положения упругое противодействие крепежных деталей (центрирующей шайбы и внешнего гофра диффузора) растет уже не пропорционально смещению системы, а значительно быстрее. Колебания диффузора при этом уже не будут в точности повторять все изменения силы, действующей на подвижную систему. Такая система и возникающие в ней искажения называются нелинейными.

Исследования этих искажений показали, что главной причиной их появления является внешний гофр диффузора. Поэтому в мощных динамиках применяют сложные диффузоры: конус из жесткого материала, а гофры — из плотной, но мягкой материи. Такая система обеспечивает достаточную податливость гофра и снижает искажения.

Другой причиной нелинейных искажений на низких частотах является неравномерность магнитного поля в рабочем зазоре — на концах зазора магнитное поле спадает. Характер спадания поясняется графиком на фиг. 16. При больших амплитудах, имеющих место на низких частотах, звуковая катушка частично выходит из области, где магнитное поле постоянно. При этом электродинамическая сила, действующая на катушку, уменьшается в той или иной степени в зависимости от положения катушки (электродинамическая сила пропорциональна величине магнитной индукции $F = B \cdot l \cdot i$).

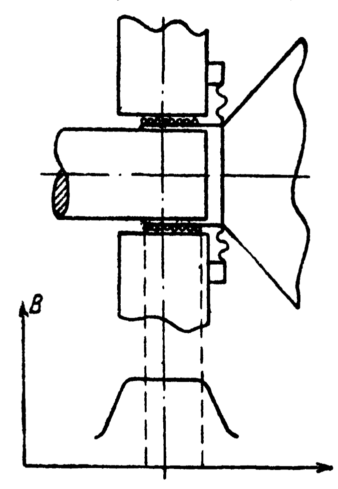
Это тоже приводит к нелинейным искажениям, которые увеличиваются с ростом амплитуды. Поскольку амплитуда обратно пропорциональна частоте, то искажения резче всего сказываются на низких частотах.

На средних частотах нелинейные искажения тоже имеются, но они возникают по другим причинам. Здесь источником искажений являются так называемые параметрические колебания конуса. Эти искажения внешне проявляются в своеобразном дребезжании конуса на очень громких звуках. Исследование этого явления показало, что дребезжание вызывается появлением призвука, частота которого в два раза меньше частоты воспроизводимого тона (призвук на октаву ниже основного тона).

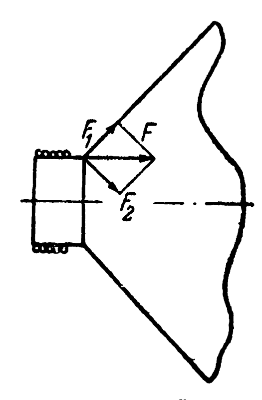
Механизм возникновения параметрических колебаний заключается в следующем. Электродинамическая сила F, действующая на звуковую катушку (фиг. 17), направлена по оси диффузора. Эту силу, по известному правилу параллелограмма, можно представить себе состоящей из двух сил.

Одна из них, F_1, направлена вдоль поверхности конуса, а вторая, F_2, перпендикулярно к ней. Сила F_2 возбуждает на поверхности диффузора поперечную волну, такую же, какую легко получить на веревке в известном опыте, о котором мы уже упоминали (фиг. 2). Длина этой волны зависит как от скорости ее распространения по бумаге, так и от частоты.

На низких частотах длина волны намного больше образующей конуса, и диффузор колеблется как одно целое. Но на частотах выше 2 000 *гц* по длине образующей уже укладываются несколько полуволн. Это означает, что различные



Фиг. 16. Кривая изменения магнитного поля в зазоре.

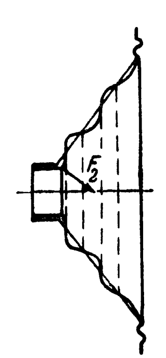


Фиг. 17. Силы, действующие на диффузор.

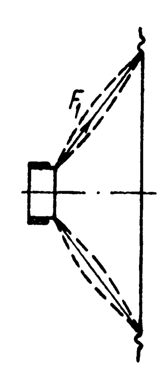
области диффузора колеблются в противоположных направлениях (с различными фазами) и с различными амплитудами. На некоторых частотах на конусе образуются стоячие волны — результат сложения прямой волны и волны, отраженной от внешнего края диффузора. На фиг. 18 приведены для примера колебания диффузора, имеющие три узловых круга, отмеченных пунктиром. Роль подобного рода колебаний мы уже выяснили в разделе «Частотная характеристика» (см. фиг. 13,*б*).

Первая сила F_1 на определенной частоте и при сильных колебаниях вызывает продольный изгиб образующей диффузора, показанный на фиг. 19 пунктиром. Прогиб диффузора происходит только тогда, когда сила F_1 направлена

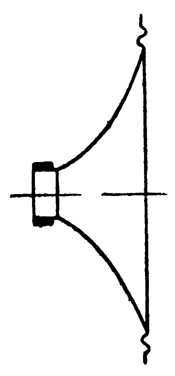
в сторону поверхности диффузора, т. е. так, как показано на фиг. 17. В следующий полупериод, когда сила направлена в обратную сторону, диффузор выпрямляется. Таким образом, за один период колебаний действующей силы диффузор успевает прогнуться в одну какую-либо сторону и вернуться в среднее положение. За следующий период диффузор прогнется в другую сторону и опять вернется в среднее положение. Следовательно, за два периода действующей силы диффузор совершит одно параметрическое колебание, т. е. составляющая его колебаний



Фиг. 18. Поперечные колебания диффузора.



Фиг. 19. Продольные колебания диффузора.



Фиг. 20. Фигурный диффузор.

имеет частоту в два раза ниже частоты колебаний действующей силы. В результате в составе излучаемого звука на определенных частотах появляется призвук с частотой в два раза ниже основного тона. Это явление носит название параметрического резонанса. На других частотах картина этих искажений может выглядеть значительно сложнее, чем на фиг. 19.

Параметрические искажения возникают на частотах от 500—600 до 3 500—4 000 *гц*. Появление параметрических резонансов отрицательно сказывается также и на частотной характеристике. На тех частотах, на которых возникают эти резонансы, часть энергии уходит на поддержание вредных продольных колебаний. В результате на частотной характеристике образуются глубокие провалы.

Параметрические резонансы имеют место в мощных динамиках (5 *вт* и выше). Для устранения их применяют фигурные диффузоры (фиг. 20). Такой диффузор при действии

продольной силы прогибается только в сторону уже имеющегося прогиба. Этим исключается возможность возникновения параметрических резонансов, а следовательно, и искажения. В настоящее время во всех мощных динамиках устанавливаются фигурные диффузоры.

Как же оценивается величина нелинейных искажений, вносимых динамиком в передачу? Оказывается, что однозначно оценить величину этих искажений не представляется возможным. Дело в том, что причины этих искажений весьма разнообразны и зависят не только от частоты и силы звука, но и от его сложности.

Наиболее распространенным, хотя далеко не исчерпывающим, критерием величины нелинейных искажений, даваемых любым устройством, является так называемый коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник). Для измерений этого коэффициента на вход устройства подаются колебания какой-нибудь одной частоты. Если устройство вносит нелинейные искажения, то на его выходе, кроме основного колебания, появляются еще колебания более высоких частот, кратные основной (так называемые гармоники).

Коэффициентом гармоник называется отношение квадратного корня из суммы квадратов амплитуд гармоник к амплитуде основного колебания. Это отношение обычно выражают в процентах.

Какой же величины искажения еще допустимы в воспроизведении звуковых программ? Оказывается, величина допустимых искажений сильно зависит от частоты. На средних и высоких частотах величина коэффициента гармоник не должна превышать 4—5%; в области же низших частот эта величина может быть значительно больше. Объясняется это свойствами слуха.

КАК УЛУЧШИТЬ РАБОТУ ДИНАМИКА

Мы выяснили, что динамик вносит в воспроизводимую программу два вида искажений — частотные и нелинейные. Чем меньше эти искажения, тем лучше работа динамика.

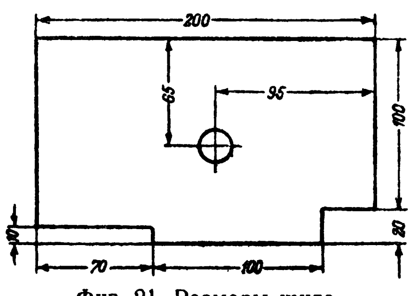
Как же уменьшить вносимые динамиком искажения?

Для улучшения чистоты воспроизведения низких частот (уменьшения нелинейных искажений) в мощных динамиках иногда можно осторожно распушить поверхность внешних гофров диффузора с помощью мелкой наждачной бумаги.

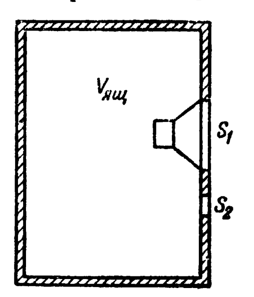
При этом одновременно с увеличением податливости гофров снижается резонансная частота подвижной системы динамика, что уменьшает неравномерность частотной характеристики на низких частотах.

Значительно большие возможности имеются в области уменьшения частотных искажений динамика, т. е. уменьшения неравномерности частотной характеристики чувствительности динамика и расширения полосы воспроизводимых им частот.

Вследствие явления «акустического короткого замыкания» (см. главу «Частотная характеристика динамика») динамики хуже всего воспроизводят низкие частоты. Это явление можно уменьшить, установив динамик в щите достаточно большого размера. Размеры щита, обеспечивающего хорошее воспроизведение низких частот, приведены на фиг. 21. Прак-



Фиг. 21. Размеры щита.



Фиг. 22. Устройство фазоинвертера.

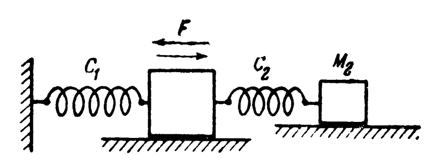
тически в радиовещательных приемниках щиты не применяются, здесь громкоговоритель монтируется в ящике. При условии достаточной жесткости стенок такой ящик влияет на излучение приблизительно так же, как и щит со стороной, равной сумме ширины и двойной глубины ящика. Ящики большинства вещательных приемников имеют небольшие размеры и поэтому мало влияют на улучшение условий излучения низких частот.

Хорошие результаты дает применение ящика специальной конструкции — фазоинвертера, имеющего сравнительно небольшие размеры. Фазоинвертер представляет собой ящик с одним—двумя отверстиями, расположенными рядом с отверстием для динамика (фиг. 22). Через дополнительные отверстия проходят звуковые колебания, излучаемые обратной стороной диффузора. Объем ящика и размеры отвер-

стий подбираются так, что эти колебания в диапазоне низких частот совпадают по фазе с колебаниями передней стороны диффузора. Таким образом, фаза излучения обратной стороны диффузора переворачивается или, как говорят, инвертируется. Отсюда и происходит название—фазоинвертер.

Механизм переворачивания фазы в фазоинвертере сводится к следующему. Упругость воздушного объема внутри ящика аналогична упругости пружины, а масса воздуха в отверстии, представляющем собой короткую трубку, — массе некоторого поршня. Таким образом, к подвижной системе динамика подсоединена через пружину некоторая масса.

Механическая модель этой системы приведена на фиг. 23. Действующая сила приложена к массе подвижной системы динамика — M_1. Проследим, как будут происходить колебания системы, если частота действующей силы будет увеличиваться. На очень низких частотах пружина C_2 почти не деформируется, и обе массы двигаются совместно, т. е. с одинаковой фазой. По мере увеличения частоты



Фиг. 23. Механическая модель фазоинвертера.

и приближения к резонансу системы M_2—C_2 пружина C_2 претерпевает все большую деформацию — движение массы M_2 все более запаздывает по фазе относительно движения массы M_1. При этом часть каждого периода обе массы двигаются в противоположных направлениях. С повышением частоты эта часть периода увеличивается. Пружина C_2 испытывает все увеличивающуюся деформацию и тем самым все больше и больше тормозит движение массы M_1. На частоте резонанса системы M_2—C_2 это торможение достигает наибольшего значения. При дальнейшем увеличении частоты упругое сопротивление пружины C_2 становится меньше инерционного сопротивления массы M_2 и поэтому здесь обе массы большую часть периода двигаются в различные стороны.

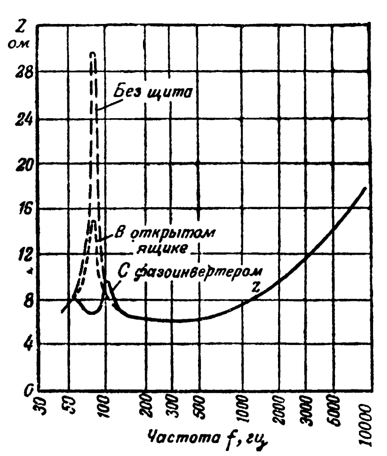
Таким образом, фаза колебания массы M_2 на этих частотах обратна фазе колебания массы M_1.

Известную всем разновидность системы, изображенной на фиг. 23, представляет собой детская игрушка — мяч на резинке. Каждый, кто пытался заставить мяч двигаться навстречу руке, знает, что для этого надо колебать руку с

частотой, равной или несколько большей частоты собственных колебаний мяча.

Перенося наши рассуждения на фазоинвертер, делаем вывод, что переворачивание фазы колебаний обратной стороны диффузора происходит на частотах, лежащих выше резонанса системы, состоящей из воздушного объема ящика и массы воздуха в дополнительном отверстии. Резонансную частоту этой системы обычно берут равной резонансной частоте подвижной системы динамика. Таким образом, в рабочем диапазоне частот излучение отверстия совпадает по фазе с излучением передней стороны диффузора, и акустическая мощность, отдаваемая динамиком на низких частотах, заметно повышается. Опыт показывает, что помещение динамика в фазоинвертер повышает его чувствительность на частотах 60—200 *гц* в два с лишним раза, а кроме того, уменьшает неравномерность частотной характеристики.

Помещение динамика в фазоинвертер благоприятно сказывается также и на величине нелинейных искажений. Наличие дополнительной нагрузки уменьшает амплитуду колебаний диффузора, а следовательно, и нелинейные искажения. Кроме того, уменьшение аплитуды на частотах, близких к частоте резонанса подвижной системы, уменьшает резонансный пик полного сопротивления динамика (фиг. 24), что также снижает нелинейные искажения, создаваемые этим пиком в выходной ступени усилителя. Именно из соображений снижения амплитуды колебаний диффузора на резонансе фазоинвертер настраивают на частоту резонанса подвижной системы динамика.

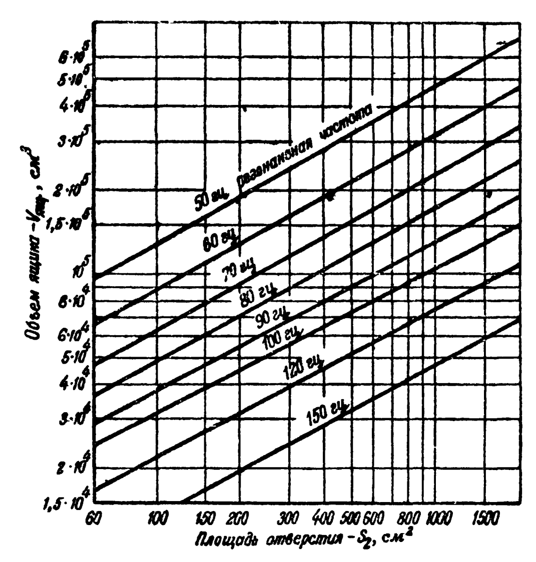


Фиг. 24. Влияние фазоинвертера на сопротивление динамика.

В данных динамика не всегда указывается его резонансная частота, но ее нетрудно определить опытным путем. Если на звуковую катушку подать небольшое напряжение от звукового генератора, то можно обнаружить, что на некоторой частоте (частоте резонанса подвижной системы)

амплитуда колебаний значительно больше, чем на всех остальных частотах. При этом испытании на динамик должно быть подано подмагничивание (если оно имеется). Резонансную частоту подвижной системы динамика можно также определить методом вольтметра — амперметра: при резонансе динамик потребляет наименьший ток вследствие роста его входного сопротивления.

Настройка фазоинвертера на резонансную частоту динамика может быть осуществлена при различных размерах отверстия и разных объемах ящика так же, как и контур с



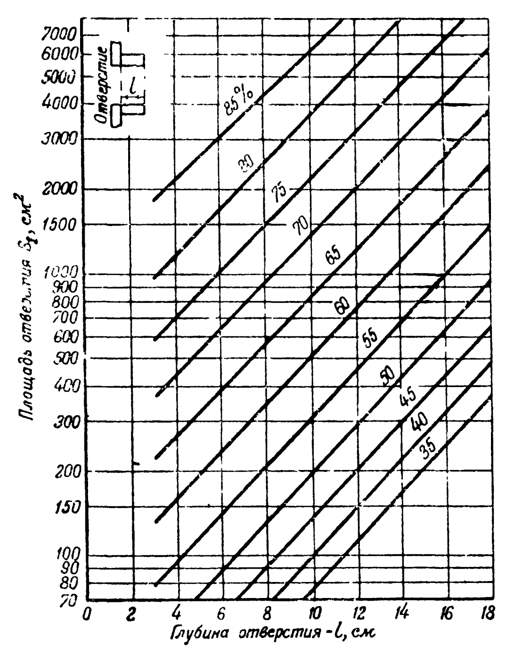
Фиг. 25. Кривые зависимости объема ящика от площади излучающего отверстия.

заданной частотой резонанса можно получить при разном соотношении L и C.

Наилучшие результаты, однако, получаются тогда, когда площадь отверстия вдвое меньше площади излучателя S_1. Зная диаметр диффузора, можно вычислить площадь излучателя S_1 и, разделив на два, определить площадь фазоинверсного отверстия S_2. Полученные таким образом данные (резонансная частота и площадь отверстия) используются для нахождения необходимого объема ящика по номограмме, изображенной на фиг. 25. При построении номограммы предполагалось, что глубина отверстия, т. е.

толщина стенки ящика в том месте, где оно сделано, равна 19 *мм* (вообще же стенки ящика могут быть и тоньше — 10—12 *мм*).

В радиолюбительской практике для изготовления фазоинвертера можно воспользоваться уже готовым ящиком, объем которого может не совпадать с найденным по номограмме. Если различие невелико, то проще, пользуясь этой же номограммой, изменить размеры отверстия, считая уже заданным объем, а не площадь отверстия. Если объем



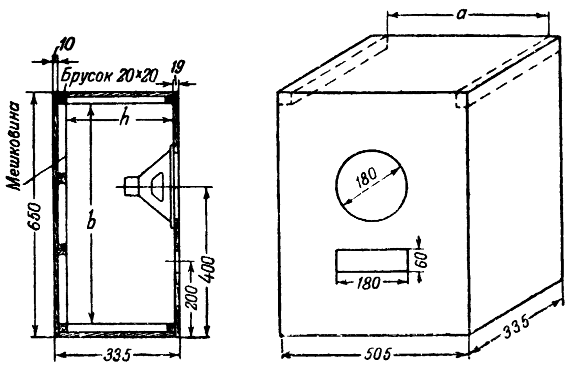
Фиг. 23. Номограммы для подсчета уменьшения объема ящика.

имеющегося ящика меньше, чем это нужно по расчету, то для настройки фазоинвертера отверстие также должно быть уменьшено. Далеко итти в этом направлении не следует, так как если отверстие превратится в небольшую щель, то улучшения звучания оно, конечно, не даст.

Уменьшения размеров ящика можно достигнуть, увеличивая глубину отверстия (увеличивая массу воздуха в отверстии). Получаемое при этом уменьшение объема ящика определяется по номограмме, которая изображена на

фиг. 26. Из номограммы видно, что с увеличением глубины отверстия l объем ящика можно уменьшить примерно в три раза по сравнению с объемом, полученным по номограмме, изображенной на фиг. 25.

При определении внутренних размеров ящика по найденному объему нужно учитывать объем воздуха, вытесняемый динамиком. Так как при расчете трудно все учесть, например, глубина отверстия может отличаться от 19 *мм*, то практически фазоинверсное отверстие лучше сделать несколько больше расчетного и настроить фазоинвертер, закрывая часть отверстия. Такой настройкой можно точно определить необходимый размер отверстия.



Фиг. 27. Эскиз фазоинвертера для динамика ДД-3.

Заднюю и боковые стенки ящика фазоинвертера желательно покрыть внутри каким-либо звукопоглощающим материалом: минеральной шерстью, войлоком, ватой и т. д. Звукопоглощающий материал, не влияя существенно на воспроизведение низких частот, улучшает звучание высоких частот, устраняя нежелательные собственные колебания воздушного объема ящика, могущие иметь место в области средних и высоких частот.

Ящик фазоинвертера должен быть сделан достаточно прочным и иметь толщину стенок не меньше 10—15 *мм* для того, чтобы устранить возможность их вибрации.

Эскиз фазоинвертера для динамика ДД-3, имеющего резонансную частоту, равную 70 *гц*, и внешний диаметр диффузора — 20 *см*, представлен на фиг. 27. В этой конструкции в качестве звукопоглощающего материала применена мешковина, набитая в два слоя на планки.

РАСШИРЕНИЕ ПОЛОСЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Прогресс техники радиовещания — вещание на ультракоротких волнах и переход на частотную модуляцию — позволил обеспечить в высококачественных установках передачу и прием достаточно широкой полосы частот. Поэтому сейчас полоса частот, пропускаемая всем радиовещательным трактом, определяется главным образом его последним звеном — громкоговорителем.

В чем же трудности создания динамика, воспроизводящего широкую полосу частот?

Они заключаются в основном в том, что условия, способствующие хорошему воспроизведению низких частот, противоречат условиям хорошего воспроизведения высоких частот.

В области низких частот условия излучения тем лучше, чем больше и жестче диффузор, чем ниже резонансная частота колебательной системы. В общем балансе передаваемой звуковой мощности большая часть приходится на область низких частот — до 1 000 *гц*. Для воспроизведения данной мощности звуковая катушка должна быть достаточно массивной. Удовлетворение этих условий неизбежно влечет за собой увеличение массы подвижной системы диффузора.

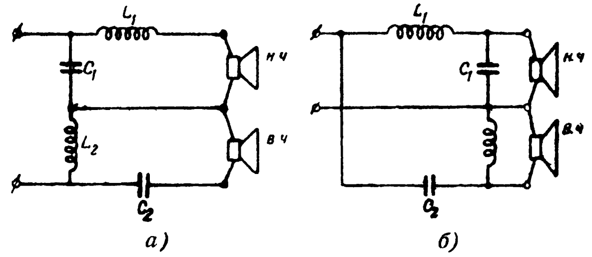
В области высоких частот условия излучения тем благоприятнее, чем легче и, до известных пределов, чем меньше диффузор. Такой диффузор (как было показано на фиг. 14) вплоть до самых высоких частот обеспечивает необходимую равномерность характеристики отдачи. Кроме того, на область высоких частот приходится лишь небольшая мощность (примерно 5% всей мощности). Здесь можно безболезненно уменьшить размеры и массу подвижной системы.

Так как получить собственную частоту подвижной системы динамика ниже 70—80 *гц* не удается, то для воспроизведения всей полосы частот конструкторам приходится создавать сложную систему, состоящую из двух частей: одна предназначена для излучения низких и средних частот, а другая — для излучения высоких частот.

В радиовещательных приемниках такая система составляется из двух динамиков: одного с большим диффузором для воспроизведения низких частот, второго — маленького с небольшим диффузором и легкой подвижной системой — для воспроизведения высоких частот. Оба динамика вклю-

чаются на выход усилителя через разделительный фильтр. Фильтр служит для того, чтобы колебания низкой частоты попадали на низкочастотный, но не попадали на высокочастотный динамик, и, наоборот, чтобы колебания высокой частоты попадали только на высокочастотный динамик. Такое разделение совершенно необходимо, так как в противном случае низкочастотный динамик будет непроизводительно поглощать энергию высокочастотных колебаний, а высокочастотный может выйти из строя, так как он будет сильно перегружен колебаниями низкой частоты.

Две схемы разделительного фильтра показаны на фиг. 28,*а* и *б*. В этих схемах обычно $C_1 = C_2$ и $L_1 = L_2$, а



Фиг. 28. Схемы разделительных фильтров.

величины их зависят от сопротивлений нагрузки R и от выбранной частоты раздела. Последняя должна лежать в пределах от 500 до 1 000 *гц*.

При включении двух динамиков надо проследить, чтобы их диффузоры колебались в фазе. Практически проверку правильности включения диффузоров легко произвести на слух, поменяв местами выводы звуковой катушки у одного из них. Если динамик был включен правильно, то при таком переключении громкость работы приемника на средних частотах заметно уменьшится. Если же включение было неверным, то, наоборот, звучание приемника станет более громким и чистым.

В последнее время советские конструкторы провели большую исследовательскую работу по расширению полосы воспроизведения динамиков, устанавливаемых в приемниках 2-го и 3-го классов. Основное в этих исследованиях заключается в следующем.

Каждому радиолюбителю известно, что ящик приемника существенно влияет на ход его частотной характеристики, а следовательно, и на качество звучания. До сих пор было

общепринятым оценивать влияние ящика, в котором установлен динамик, так же, как и влияние щита. Считалось также, что чем ниже собственная частота динамика, тем лучше. Исследования, проведенные в лаборатории, руководимой т. Шифман, показали, что такая трактовка не охватывает всего комплекса вопросов работы динамика. Оказалось, что ящик представляет собой сложную акустическую резонансную систему, которая оказывает существенное влияние на частотную характеристику.

Основная резонансная частота этой системы лежит в области низких частот и на этой частоте характеристика чувствительности динамика, установленного в ящике, имеет заметный пик.

Типичная частотная характеристика динамика, имеющего диаметр диффузора 200 *мм* и работающего в радиоприемнике, в области низких частот имеет такой же вид, как и характеристика, показанная на фиг. 12.

Характерным для этой характеристики является наличие двух пиков — на частоте 70 *гц* и на частоте примерно 250 *гц*. Пик на 70 *гц*, как мы выяснили выше, определяется резонансом механической системы динамика. Пик же на 250 *гц*, как показали исследования, вызывается резонансом акустической системы ящика приемника. Между этими двумя пиками характеристика имеет значительный провал, вследствие чего область частот от 100 до 250 *гц* воспроизводится весьма плохо. В результате, несмотря на то, что резонанс механической системы динамика лежит на низкой частоте — 70 *гц*, граница полосы эффективно воспроизводимых приемником частот лежит примерно на частоте 180—200 *гц*.

Следовательно, естественное стремление конструкторов снизить собственную частоту динамика не привело в данном случае к улучшению воспроизведения низких частот. В свете приведенных рассуждений оказалось необходимым выбирать эту частоту, исходя из условий работы динамика в ящике.

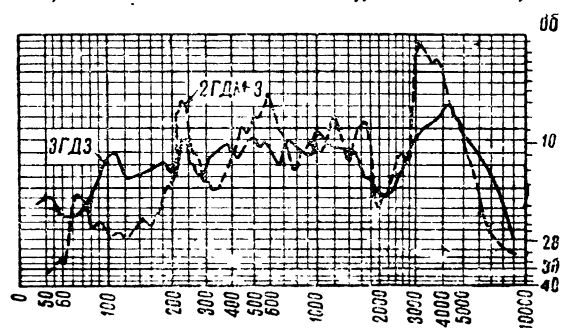
Расчет и проведенная экспериментальная проверка показали, что у динамика, предназначенного для приемников 2-го класса (типа «Восток», «Родина», «Урал» и т. д.), резонансная частота механической системы должна быть равна примерно 110 *гц*, а у динамика, предназначенного для приемников «Рекорд», АРЗ-49 и «Москвич» — даже 140 *гц*.

На основе приведенных выводов были разработаны новые модели динамических громкоговорителей, предназначенных для установки в радиоприемниках 2-го и 3-го классов

Громкоговоритель для приемников 3-го класса (тип 1-ГД-1) обеспечивает воспроизведение полосы частот от 150 до 5 000 *гц* при неравномерности 15 *дб*. Его номинальная мощность 1 *ва*. Среднее звуковое давление, создаваемое громкоговорителем на расстоянии 1 *м* при подведении к нему мощности 0,1 *ва* на частоте 400 *гц*, не ниже 2,5 бар.

Громкоговоритель для приемников 2-го класса (тип 3-ГД-3) обеспечивает воспроизведение полосы частот от 100 до 6 000 *гц* с неравномерностью 15 *дб*. Его номинальная мощность — 3 *ва*.

Звуковое давление, создаваемое громкоговорителем типа 3-ГД-3 на расстоянии 1 *м* при подведении к нему мощности 0,1 *ва* на частоте 400 *гц*, не ниже 2,5 бар.



Фиг. 29. Частотные характеристики динамиков типа 2-ГДМ-3 и 3-ГД-3.

Для сравнения можно указать, что динамик типа 2-ГДМ-3, устанавливавшийся ранее в приемниках второго класса, воспроизводил полосу частот от 140 до 6 000 *гц* с неравномерностью в 20 *дб*. Частотные характеристики динамиков типа 2-ГДМ-3 и 3-ГД-3 приведены на фиг. 29.

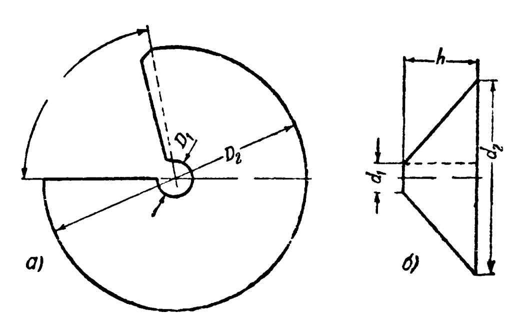
ПРОСТЕЙШИЙ РЕМОНТ ДИНАМИКА

В заключение остановимся на способах устранения характерных повреждений динамика.

Наиболее часто встречается механическое повреждение диффузора, вызванное неосторожным обращением с дина-

миком. Если повреждение невелико, то на образовавшееся отверстие или трещину можно наклеить заплату из не слишком жесткой чертежной бумаги (например, из полуватмана). Клеить можно целлулоидным или любым клеем для бумаги.

Если диффузор разорван очень сильно, то следует сменить весь его конус. Для такой замены из полуватмана вырезается заготовка, размеры которой зависят от размеров заменяемой части диффузора и от угла его раскрытия. Форма заготовки показана на фиг. 30,*а*.



Фиг. 30. Заготовка для конуса диффузора.

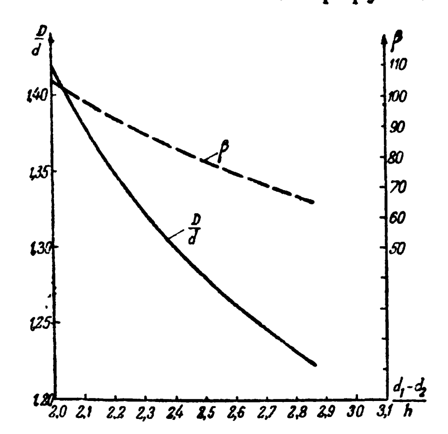
Для того чтобы определить требуемые размеры заготовки, надо промерить поврежденный конус диффузора. Необходимо измерить большой и малый диаметры той части конуса, которую мы хотим заменить, а также ее глубину, обозначенную на фиг. 30,*б* буквой h. Зная эти три величины, по графику фиг. 31 находим угол β выреза в заготовке, а также отношение внутреннего и внешнего диаметров заготовки к соответствующему диаметру заменяемого пояса диффузора. Зная это отношение и диаметры краев заменяемого пояса, легко подсчитать требуемые диаметры заготовки по формулам:

$D_1 = k \cdot d_1$ и $D_2 = k \cdot d_2$, где $k = \frac{D}{d}$ берется из графика фиг. 31.

График составлен для углов раскрытия от 90 до 110°, в этих пределах должны лежать углы раскрытия диффузоров динамиков. При меньшем угле диффузор получается излишне тяжелым, а при большем — недостаточно жестким.

Наиболее неприятным является повреждение гофров диффузора. Здесь нельзя ставить заплатку, так как при этом заклеенное место нарушает податливость подвеса. В случае такого повреждения можно заменить гофр подвесом из тяжелой и плотной материи (типа сукна). Можно изготовить подвес из мягкой бумаги, но такая система не обеспечивает хорошего воспроизведения низких частот. Во всех случаях ремонт надо проводить так, чтобы жесткость гофров по окружности была одинаковой.

Иногда повреждается и центрирующая шайба. В динамиках употребляются два вида центрирующих шайб — на-



Фиг. 31. Графики для расчета основных размеров заготовки.

ружные и внутренние. Шайбы, помещаемые внутри диффузора, изготовляются из тонкого гетинакса или текстолита Для замены шайбу можно вырезать также из тонкого картона. Вырезать надо по форме шайбы, стоявшей в динамике, но ее диаметр следует увеличить примерно на 3 *мм*. После изготовления внешний край шайбы подрезается на глубину ~ 1,5 *мм* и отгибается перпендикулярно к плоскости шайбы с тем, чтобы ее можно было плотно вставить внутрь звуковой катушки и приклеить.

Внешние шайбы делают как текстолитовые, так и бумажные. Бумажная центрирующая шайба изготовляется так же, как и диффузор, путем литья. Такую шайбу можно заменить фигурной, сделанной из картона.

Иногда поврежденной оказывается звуковая катушка.

Происходит это обычно в результате старения клея. Если дефект заключается только в том, что витки катушки оказываются незакрепленными, то это легко исправить с помощью целлулоидного или шеллачного клея. Если же витки соскочили с катушки и провод оборвался, то придется намотать новую катушку.

Звуковая катушка наматывается на каркас из тонкой писчей бумаги, сделанный точно по размеру катушки динамика. Каркас изготовляется на круглом шаблоне, диаметр которого должен быть примерно равен внутреннему диаметру катушки динамика. Все изготовление катушки, включая ее приклейку к диффузору, ведется на шаблоне. Это предупреждает перекосы и деформацию катушки. Провод для намотки берется такой же, как и на поврежденной катушке. После намотки провод приклеивается к каркасу с помощью шеллачного клея.

Приклеить каркас звуковой катушки к диффузору можно любым клеем для бумаги. Установив и приклеив каркас, дают клею просохнуть в течение нескольких часов (лучше оставить систему сохнуть на ночь) Только после того, как место склейки окончательно просохнет, катушку можно снять с шаблона.

Установка подвижной системы на место и центровка ее производятся следующим порядком Внутрь звуковой катушки вставляют четыре длинные полоски писчей бумаги шириной 4—6 *мм*. Эти полоски должны быть равномерно распределены по окружности катушки. Затем катушку вместе с полосками бумаги вставляют в рабочий зазор, закрепляют с помощью винтов центрирующую шайбу и приклеивают внешние края диффузора к держателю. После просыхания клея осторожно вынимают бумажные полоски и, легко надавливая на диффузор, проверяют, свободно ли звуковая катушка двигается в зазоре. При правильной установке катушка не должна задевать за его стенки. Если же катушка где-нибудь касается стенок зазора, то следует отпустить винты, закрепляющие центрирующую шайбу, и еще раз провести центровку с помощью полосок из писчей бумаги.

ДАННЫЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

Тип динамика	Мощность, *вт*	Звуковая катушка			Катушка подмагничивания			№ примечания
		Сопротивление, *ом*	Число витков	Диаметр провода, *мм*	Сопротивление, *ом*	Число витков	Диаметр провода, *мм*	
От приемника:								
6Н-1	3	1,7—1,9	52	0,23	1 256	11 000	0,16	1,2
6Н-25	3	1,9	51—53	0,23	4 500	23 000	0,13	3
Д-11	15	7	—	—	1 750	18 250	—	
Т-689	5	12	—	—	870	1 500	0,23	
ВЭФ-М557	3	2,2	23	0,22	900	11 000	0,18	6
ВЭФ-М1357	12	7,5	92	0,22	245	7 900	0,35	4
„Ленинград“	4	10	75	0,15	3 000	25 000	0,18	
„Салют“	3	3	60	0,16	1 450	20 000	0,18	
СВД-9 (ДД-3)	3	2,5	61	0,2	750	10 000	0,24	
„Электросигнал 2“	3	3	52	0,18	С постоянным магнитом			
СВД-М (Акустик)	5	4	61	0,2	750	10 000	0,24	
					7 000	33 000	0,12	5
А-695	3	3,0		С постоянным магнитом				
СИ-235	0,6	1,7	52	0,23	1 265	11 000	0,16	
СИ-235	0,6	1,5	49	0,25	10 000	37 500	0,1	

Примечания:

1. Все катушки (звуковые и подмагничивания) намотаны проводом ПЭ.
2. Аналогичные данные имеет динамик от приемника 9Н-4. Динамик имеет антифонную обмотку 27 витков провода 1,2 ПШД.
3. Аналогичные данные имеют также динамики от приемников 7Н-27 („Восток“). Антифонная катушка этих динамиков имеет 28 витков провода 0,8 ПБД.
4. Звуковая катушка намотана алюминиевым проводом.
5. Аналогичные данные имеет динамик от приемника СВД-1.
6. Динамик имеет антифонную обмотку 22 витка ПЭЛ 0,8.